
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ (ОБЗОР)

© 2021 г. В. Н. Антипов¹, *, А. Д. Грозов¹, А. В. Иванова¹

¹*Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия*

**e-mail: bht@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.01.2021 г.

После доработки 01.04.2021 г.

Принята к публикации 05.04.2021 г.

Перспективное развитие интеллектуальной электроэнергетики базируется на использовании функциональных материалов, созданных на основе последних достижений науки и технологии. Свойства интеллектуальных материалов изменяются при воздействии каких-либо внешних факторов. Способность таких материалов преобразовывать один вид энергии в другой и возможность управлять этим преобразованием, позволяют создать для выполнения сложных функций различные датчики и исполнительные устройства, которые широко используются в электроэнергетике. В обзорной статье рассмотрено применение сверхпроводников для улучшения характеристик электрооборудования энергетического назначения и показаны очевидные преимущества высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий, трансформаторов и электрических машин. Представлены интеллектуальные материалы, введение которых в состав высоковольтной изоляции позволяет контролировать ее качество в процессе эксплуатации, и материалы, запускающие процесс самовосстановления изоляции при появлении микротрещин, а также оптимальные микроструктуры магнитотвердых материалов в различных температурных режимах.

Ключевые слова: интеллектуальные материалы, высокотемпературные сверхпроводники, ВТСП кабели, ВТСП трансформаторы, ВТСП электрические машины, постоянные магниты, высоковольтная изоляция

DOI: 10.31857/S013266512104003X

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость инновационно-интеллектуального развития электроэнергетики страны определяется многими объективными условиями, социально-экономическими факторами, эволюционным технологическим развитием энергосистемы. Концепция “интеллектуальной” энергетической системы заключается в создании системно-интегрированной и самоуправляемой в режиме реального времени системы, которая имеет единую сетевую инфраструктуру, технологически и информационно связывающую все генерирующие источники энергии и всех потребителей. Технологическое оборудование и средства автоматического управления, необходимые для “интеллектуальной” энергетической системы, начали создаваться с середины 70-х гг. XX в. Сегодня “интеллектуальная” энергетическая система невозможна без материалов 3-го поколения, созданных на основе достижений наукоемких технологий, – так называемых “умных”, или интеллектуальных материалов (ИМ), свойства которых изменяются при воздействии каких-либо внешних факторов [1–6]. Основными типами ИМ являются

самодиагностирующиеся ИМ (пассивные конструкции) и адаптирующиеся ИМ (активные конструкции с дополнительными устройствами – актюаторами). Для достижения наилучшей реакции на изменяющиеся условия возможно оптимизировать их свойства путем “обучения”. Внешними факторами, изменяющими свойства материалов, могут быть механические нагрузки, электрическое поле, магнитное поле, температура, свет, влажность, химические свойства среды и т.п. Изменение свойств ИМ является обратимым и многократным. Среди разработанных интеллектуальных материалов можно отметить: сплавы с “памятью формы”, которые после деформации восстанавливают первоначальную форму при нагревании (наиболее известный сплав – нитинол), самовосстанавливающиеся материалы (self-healing materials), которые могут самостоятельно исправлять возникающие в них дефекты; самосмазывающиеся материалы (self-lubricating materials), которые уменьшают трение или износ, применяются в виде покрытий, обладающих для уменьшения износа твердостью, для уменьшения адгезии и трения – низкой поверхностной энергией. Как правило, это композиты с наполнителями из металлов, полимеров или керамики и матрицей, обеспечивающей структурную целостность; самоочищающиеся материалы (self-cleaning materials), отталкивающие воду и органические жидкости; пьезоэлектрики, вырабатывающие электричество при приложении механической нагрузки (наиболее известен материал PZT – цирконат титаната свинца); фотомеханические материалы, изменяющие форму под воздействием света; магнитореологические жидкости, при наложении магнитного поля увеличивающие вязкость в направлении, перпендикулярном направлению поля, в отсутствие магнитного поля представляющие собой суспензию хаотически расположенных магнитных микрочастиц (чаще всего железа) в различных маслах; магнитострикционные материалы, изменяющие форму в магнитном поле, при приложении механической нагрузки, изменяют намагниченность (наиболее известный материал – терфенол-Д); электрострикционные материалы, изменяющие форму в электрическом поле; электрохромные материалы, меняющие оптические свойства при электрических воздействиях (жидкокристаллические дисплеи); пироэлектрики, вырабатывающие электричество при изменении температуры; “умные” гели, способные сжиматься или набухать по сравнению с исходными габаритами на порядки (до 1000 раз).

Основная особенность ИМ – это их способность преобразовывать один вид энергии в другой. Этим преобразованием можно управлять, что определяет использование ИМ для выполнения сложных функций датчиков и исполнительных устройств. Датчик преобразует действие в сигнал, а исполнительное устройство – сигнал в действие. Безусловно, такие устройства широко используются в электроэнергетике страны, однако перспективным направлением для энергетики и электротехники в области функциональных материалов являются материалы, обеспечивающие создание высокоэффективного оборудования: кабелей, трансформаторов, электрических машин, электрохимических преобразователей и накопителей энергии [3, 7–11].

Цель настоящей работы – анализ улучшения характеристик электрооборудования энергетического назначения за счет применения интеллектуальных материалов. Рассмотрены высокотемпературные сверхпроводниковые материалы, интеллектуальные магнитные и изоляционные материалы, применяемые в энергетике.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования базируется на системном анализе реального состояния и тенденций развития интеллектуальной электроэнергетики и применения интеллектуальных материалов для улучшения характеристик электрооборудования энергетического назначения. Для анализа привлечены данные ведущих производителей и науч-

ные публикации в зарубежных и отечественных журналах. Это позволило представить в статье наиболее значимые достижения в создании сверхпроводящих кабелей, ВТСП трансформаторов и электрических машин, а также функциональных магнитных и изоляционных материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Высокотемпературные сверхпроводниковые материалы

Открытие в 1986 г. явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), появление к середине 1990-х доступных ВТСП-проводников и возможность использования криогенных систем на дешевом жидком азоте активизировало исследования и разработки электрооборудования на их основе. На современном этапе развития электроэнергетики использование ВТСП является одним из приоритетных направлений для создания энергосберегающего, экологически чистого электрооборудования энергетического назначения: сверхпроводящих кабелей постоянного и переменного тока, трансформаторов, электрических машин постоянного и переменного тока, индуктивных накопителей энергии, токоограничителей, преобразователей частоты, выпрямителей, инверторов, выключателей, криотронных преобразователей и т.д. [7–11]. Энергозатраты в рефрижераторах для получения жидкого азота в том же объеме, что и жидкого гелия, оказываются меньше на два порядка. Технические и экономические характеристики сверхпроводникового электрооборудования по своим показателям значительно превосходят характеристики традиционного применяемого.

К настоящему времени создано достаточно большое число сверхпроводящих керамик, которые содержат в своем составе редкоземельные элементы и имеют температуру сверхпроводящего перехода в интервале температур от 86 до 135 К. Наиболее распространенными являются иттриевая керамика $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) с $T_c = 91$ К, висмутовая керамика $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}$ (Bi-2223) с $T_c = 115$ К, таллиевая керамика TlBaCaCuO с $T_c = 119$ К.

Для сохранения химической структуры керамики и, прежде всего, сохранения в ней неизменным числа атомов кислорода необходима защита от воздействия окружающей среды, для чего применяется защитное покрытие. Это покрытие одновременно служит матрицей. Если стабилизирующее покрытие делать из меди, то часть атомов кислорода переходит в покрытие, что приводит к постепенному исчезновению сверхпроводящего состояния. В случае защиты сверхпроводника серебром, переход атомов кислорода исключается, в результате этого структура сверхпроводника сохраняется, что обеспечивает неизменность его свойств во времени.

Одним из существенных недостатков высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) является их хрупкость. Механические свойства могут быть улучшены за счет присадок. В случае ленточного сверхпроводника его механическая прочность может быть увеличена за счет полосовой фольги из меди или стали (подложки).

Для электротехнической продукции потребуются сверхпроводники на значительные токи, поэтому проводники кабелей или шинка должны иметь поперечное сечение круглой или прямоугольной формы, а также большую длину. Высокотемпературные проводники изготавливаются из порошка металлооксидной керамики.

Сегодня технология производства длинномерных проводов первого поколения 1G (“порошок в трубе”) достаточно хорошо развита. В мире выпускаются сотни километров провода, которые идут на создание сверхпроводникового электротехнического оборудования – кабели, токоограничители, магниты. Однако провода 1G более чем на 2/3 состоят из чистого серебра, что исключает значительное снижение их стоимости в будущем (рис. 1а).

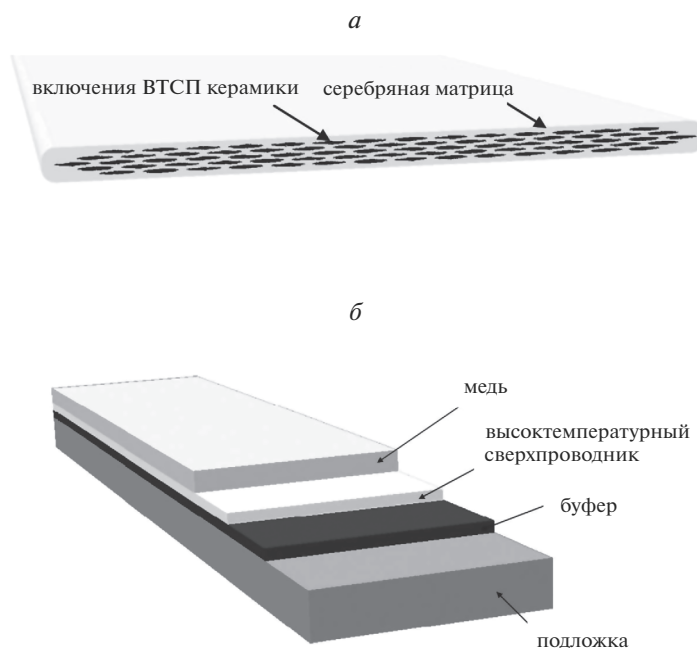


Рис. 1. Сверхпроводники первого (1G) (а) и второго (2G) поколения (б).

Следующий недостаток – разрушение сверхпроводимости во внешнем магнитном поле. Это ограничивает спектр применения сверхпроводников первого поколения устройствами с относительно слабыми рабочими магнитными полями и делает бесперспективным изготовление на их основе таких изделий как генераторы, моторы, накопители энергии и другое.

Решающее значение, как и для металлических сверхпроводников, наряду с наиболее высокой критической температурой, имеет достижение больших значений критических плотностей тока и магнитной индукции.

Необходимо отметить, что при температуре 77 К плотность тока провода Bi-2223/Ag существенно снижается даже при сравнительно небольшой магнитной индукции (0.5 Тл). При температуре 20 К плотность тока мало изменяется даже при такой магнитной индукции как 6 Тл. Этим объясняется, что фирма “Intermagnetic General Corporation” (США) ведет разработку провода Bi-2223/Ag для ротора сверхпроводникового турбогенератора мощностью 100 МВА, длиной 3000 м, который будет работать при температуре 20 К.

Во ВНИИ неорганической химии им. А.А. Бочвара создан провод Bi-2212/Ag длиной 300 м со следующими данными: площадь поперечного сечения $0.25 \times 4.4 \text{ мм}^2$, число сверхпроводящих жил или волокон 361, величина критической плотности тока провода 240 А, плотность тока по сечению сверхпроводящей части 1800 А/мм, температура 4.2 К, значение магнитной индукции нулевое. При температуре 77 К критический ток составил 20 А, а плотность тока – 150 А/мм².

Сверхпроводники второго поколения 2G (YBCO), часто именуемые “лентами с покрытием”, являются на сегодняшний день самым перспективным направлением раз-

вития технической сверхпроводимости (рис. 1б). Основное фундаментальное преимущество поколения 2G заключается в том, что они обладают максимальной плотностью критического тока. Силовое оборудование, созданное на их основе, может иметь размеры в несколько раз меньшие, чем аналогичное оборудование традиционного исполнения, притом при более высоком уровне мощности и сокращении потерь энергии. Стоимость материалов в проводе 2G ниже стоимости материалов в проводе 1G, а допустимый уровень индукции выше. Основной недостаток поколения 2G заключается в сложной технологии изготовления проводного материала на их основе и высокой стоимости, что не позволяет сегодня создать конкурентоспособные промышленные образцы массового применения [12].

Существуют технологии изготовления объемных сверхпроводников на основе ВТСП, свойства которых отличаются от пленочных сверхпроводников. Значительные магнитные поля могут захватываться и “вымораживаться” в ВТСП до 10 Тл при 45 К, что значительно больше, чем в обычных постоянных магнитах, и является перспективным свойством для технических применений. Однако технологии конструкционных материалов на основе объемных сверхпроводников пока уделяется мало внимания по сравнению с пленочными технологиями.

Сверхпроводящие кабели

Наиболее эффективным устройством в энергетике, где используется явление сверхпроводимости, является силовой сверхпроводниковый кабель (ССК). Низкотемпературная сверхпроводимость не смогла обеспечить экономическую целесообразность использования ССК из-за высокой стоимости гелия и криогенно-вакуумного оборудования. Преимущества высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий столь очевидны, что работы по их созданию проводились и проводятся во многих странах. В 2006 г. компании Sumimoto и Super Power ввели в эксплуатацию 350-метровый ССК в г. Олбани (США) кабель с рабочим током 800 А и напряжением 34.5 кВ. Все три фазы кабеля расположены в одном криостате. В том же году на подстанции Биксби (штат Огайо, США) установлен “триаксиальный” кабель с рабочим током 3000 А, напряжением 13.2 кВ. Коаксиальное расположение фаз позволило снизить расход сверхпроводника. Один из самых крупных проектов – ССК длиной 600 м, рабочим током 2400 А, напряжением 139 кВ и передаваемой мощностью 574 МВА – реализован в 2008 г. на острове Лонг-Айленд в Нью-Йорке. В Японии в системе питания Большого Токио создана сверхпроводящая кабельная линия 66 кВ, 200 МВА, в Южной Корее – сверхпроводящее кольцо в системе энергопитания г. Сеула длиной 20 км, в Германии – линия в распределительной сети г. Эссена с рабочим током 2300 А, напряжением 10 кВ и т.д.

Токонесущая способность ССК зависит от токонесущей способности сверхпроводящих лент и от магнитного поля в изделии. В кабеле магнитное поле параллельно сверхпроводнику, критический ток слабо зависит от индукции, и для изготовления кабеля могут применяться сверхпроводники поколения 1G. Однако сверхпроводящий кабель состоит из десятков сверхпроводящих лент и проектирование кабеля – комбинированная электрофизическая, механическая и криогенная задача. Базовые принципы создания ВТСП кабелей решены во ВНИИ КП [12].

В 2007 г. начались работы по созданию первого в России опытно-промышленного сверхпроводящего кабеля длиной 200 м, рабочим током 2500 А, напряжением 70 кВ. Головной организацией проекта являлся ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, соисполнителями ВНИИ КП, МАИ и ОАО “НТЦ Электроэнергетики”. Конструкция одной

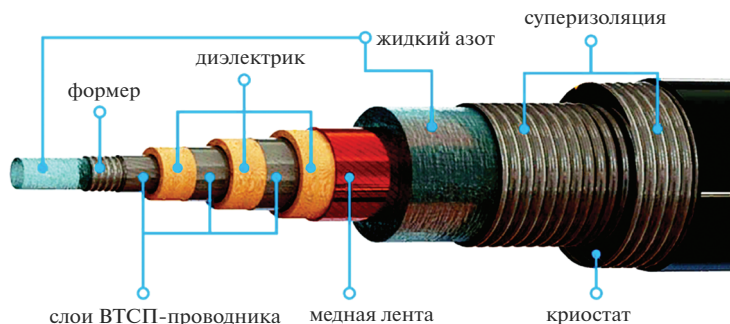


Рис. 2. Конструкция одной фазы опытного образца трехфазного силового ВТСП кабеля длиной 200 м.

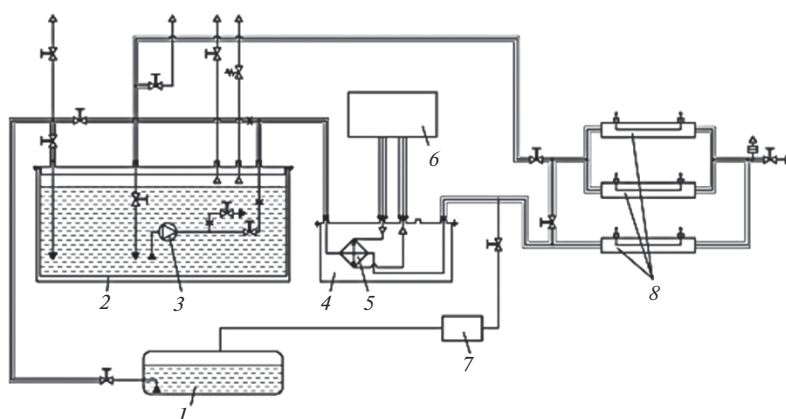


Рис. 3. Схема системы криообеспечения протяженных ВТСП кабелей: 1 – емкость для хранения жидкого азота, 2 – рабочий криостат для расходного жидкого азота, 3 – крионасос с ВТСП приводом, 4 – криостат теплообменного аппарата, 5 – теплообменный аппарат, 6 – криорефрижератор, 7 – теплообменный аппарат нагрева газообразного азота при проведении вспомогательных операций, 8 – протяженные криостаты для поддержания рабочей температуры ВТСП устройств.

фазы опытного образца трехфазного силового ВТСП кабеля длиной 200 м [13] представлена на рис. 2.

Для надежного поддержания уровня температуры ВТСП кабеля необходимы системы криообеспечения и криостатирования. В систему криообеспечения включены проточные тракты силовых устройств, криорефрижераторы и крионасосы, теплообменные аппараты и т.д. Рабочая среда – жидкий азот, жидкий неон и жидкий водород.

Решена задача создания эффективных замкнутых систем криообеспечения для поддержания теплового режима протяженных кабельных линий. Система криообеспечения протяженных ВТСП кабельных линий представлена на рис. 3 [13].

Применение ВТСП кабелей не только снижает потери за счет уменьшения сопротивления, не только уменьшает объемы и вес оборудования, но может значительно повысить эффективность всей энергосистемы, упростив ее архитектуру. ВТСП кабельная линия на генераторном напряжении может исключить необходимость повы-

Таблица 1. Сравнение характеристик систем передачи энергии

Параметр	Сопротивление, Ом/км	Индуктивность, мГн/км	Емкость, нФ/км
ВТСП кабель	0.0001	0.06	200
Кабель со шшитым полиэтиленом	0.03	0.36	257
Воздушная линия электропередачи	0.08	1.26	8.8

шающих и понижающих подстанций и воздушных ЛЭП высокого напряжения. Удачный пример – проект по улучшению энергоснабжения центра Амстердама [14]. Преимущество системы передачи энергии ВТСП кабелем показано в таблице 1 [12].

ВТСП кабели постоянного тока представляют особый интерес, т.к. сопротивление линии практически нулевое. Вместе с тем внедрение в существующие сети ВТСП кабелей и других устройств, характеристики которых отличаются от традиционных, будет оказывать влияние на интегральные характеристики сети и требует системного изучения.

Сверхпроводниковые трансформаторы

Разработки трансформаторов с использованием сверхпроводимости начались в Европе, Японии и США еще в 1960-х гг. при появлении низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), применяемых для обмоток трансформаторов. Для НТСП потребовались огромные по размерам криогенные системы для получения жидкого гелия, что сделало проект нерентабельным.

Проекты по созданию ВТСП-трансформаторов были реализованы в разных странах, начиная с 1997 г., в опытных образцах различных конструкций и мощностей [9, 15–19]. Основные преимущества ВТСП трансформаторов за счет увеличения плотности тока в обмотках на несколько порядков по сравнению традиционными заключаются в снижении потерь короткого замыкания на 90% и потерь холостого хода на 80% (магнитопровод из аморфной стали), в возможности ограничения токов короткого замыкания, в уменьшении массогабаритных показателей в 2–3 раза.

В ОАО “Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского” разработаны, изготовлены и испытаны различные образцы и лабораторные модели сверхпроводящих трансформаторов стержневого и тороидального типа с пульсирующим магнитным полем, а также электромашинного типа с вращающимся магнитным полем [20–22].

Энерго- и ресурсосберегающие показатели ВТСП трансформаторов энергетического назначения предложено улучшить за счет уменьшения магнитного поля рассеяния обмоток, достигаемого конструктивным выполнением витков и слоев. Созданы ВТСП ленточные многожильные провода первого поколения, где каждая отдельная жила находится в собственном локализованном в ее окрестности магнитном поле, и ВТСП ленточный провод второго поколения марки SS Amperium wire, ламинированный нержавеющей сталью и изолированный полиимидной пленкой.

Впервые в России создан опытный образец трехфазного трансформатора с обмотками из ВТСП проводов второго поколения и магнитопроводом из аморфной стали мощностью 1 МВА, 10/0.4 кВ [23]. По сравнению с традиционным трансформатором

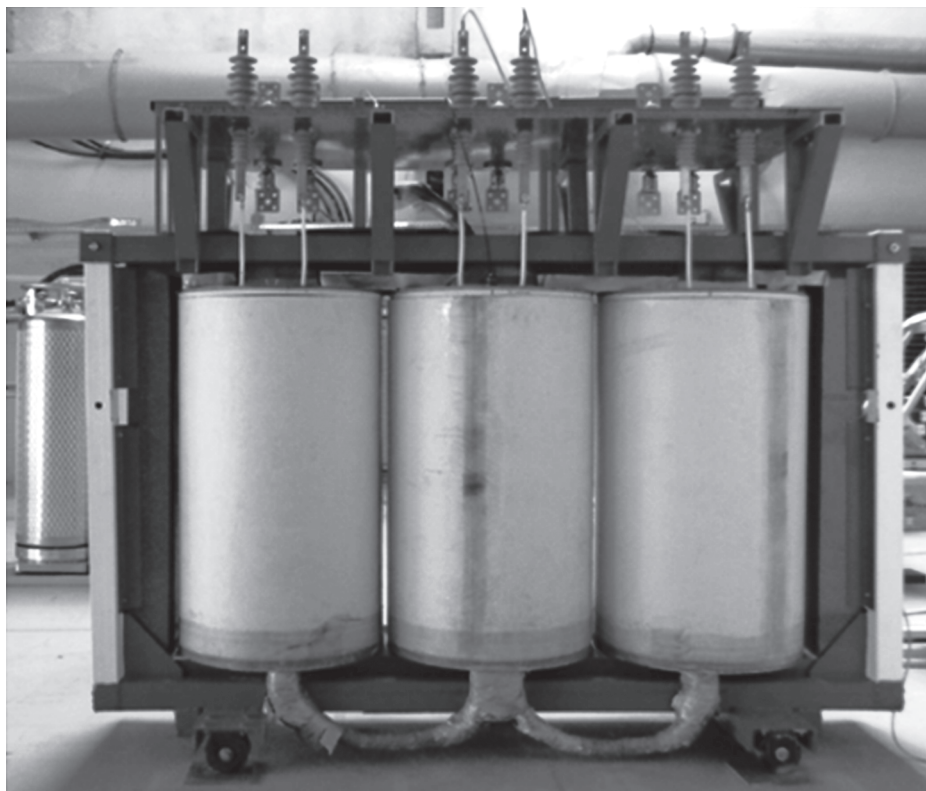


Рис. 4. Трехфазный силовой распределительный ВТСП трансформатор 1 МВА, 10/0,4 Кв.

такой же мощности, потери короткого замыкания снижены примерно в 27 раз, потери холостого хода – в 2.8 раза.

Впервые в практике ВТСП трансформаторостроения в одном устройстве применены новейшие материалы и инновационные технологии: ВТСП обмоточный провод второго поколения, аморфная электротехническая сталь, ВТСП обмотки с локализованным магнитным полем, трехфазный бронестержневой магнитопровод с верхним заплетением ярем с нахлестом (рис. 4).

Сверхпроводниковые электрические машины

Электрические электродвигатели и генераторы с ВТСП обмотками уже находят применение в промышленно развитых странах (США, Германия, Япония, Франция и др.) для привода гребных винтов морских судов, устройств для перемешивания металла в металлургии, экструдеров для протяжки металлических труб, а также в качестве ветрогенераторов. В США создан судовой сверхпроводниковый синхронный электродвигатель мощностью 36.5 МВт, 120 мин⁻¹; в Германии разработан ВТСП электродвигатель судовой назначения мощностью 4 МВт и ВТСП генератор мощностью 4 МВА; в 2008 г. фирма Сименс реализовала первый сверхпроводниковый ветрогенератор 3.7 МВт, 14 мин⁻¹.

Применение сверхпроводникового генератора при мощности 10 МВт и выше дает существенное снижение массы ветротурбины, однако из-за стоимости сверхпроводника коммерчески выгодный вариант однозначно не определен. Многие фирмы для оффшорных ВЭС отдают предпочтение безредукторному приводу, в котором достигнуто отношение вращающего момента к массе ветротурбины равное 25 кг/кНм, а также ищут различные пути снижения его стоимости. Европейские фирмы проводят интенсивные работы над проектом ветротурбины мощностью 20 МВт, а американские — над ВЭУ мощностью 50 МВт, рассматривая в качестве перспективных безредукторные сверхпроводниковые синхронные генераторы [10, 11].

Американской компанией American Superconductor (AMSC) разработан ветрогенератор “Sea Titan” 10 МВт с диаметром ротора 190 м и безредукторным сверхпроводниковым генератором на основе высокотемпературного сверхпроводника второго поколения $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Диаметр генератора 4.5–5.0 м, масса 150–180 т, КПД 96%, рабочее напряжение 690 В [24, 25].

Компания General Electric разработала проект ветрогенератора с прямым приводом мощностью 10 МВт, 10 мин⁻¹, ротор которого выполнен на основе низкотемпературного сверхпроводника NbTi, что обусловлено наличием хорошо отработанных технологий производства как данного материала, так и изготовления обмоток на его основе [26].

Прогнозируемая стоимость электроэнергии, вырабатываемой сверхпроводниковым ветрогенератором, будет на 13–18% ниже, чем у традиционного исполнения. Масса генератора 143 т, рабочее напряжение 3300 В.

Advance Magnetic Lab разработала проект полностью сверхпроводникового ветрогенератора 10 МВт, 10 мин⁻¹ с обмотками ротора и статора на основе диборида магния [27].

В России лидером по исследованию электрических машин с ВТСП является Московский авиационный институт (МАИ), в котором созданы: серия реактивных электродвигателей с массивными ВТСП элементами мощностью 1–500 кВт, электродвигатель мощностью 200 кВт для транспорта, бесконтактный синхронный генератор 1.0 МВА с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами и др. Достижения коллектива отражены в монографии [28]. Для ветроэнергетики в МАИ создан синхронный генератор мощностью $P = 1.0$ МВт, напряжение $U_{\phi} = 690$ В, частота вращения $n = 600$ мин⁻¹ с обмоткой возбуждения из ВТСП ленты поколения 2G на явнополюсном роторе и мультипликатором на основе волновой передачи с промежуточными телами качения. Классическая медная обмотка статора охлаждается водой [29]. Общий вид генератора представлен на рис. 5. Диаметр расточки статора равен 800 мм, отношение активной длины к диаметру $\lambda = 0.5$, величина воздушного зазора, включая вращающийся криостат, 10 мм.

Для поддержания рабочей температуры ротора на уровне 65–75 К использована специально разработанная замкнутая система криообеспечения.

Объемные ВТСП элементы

Существуют технологии изготовления объемных сверхпроводников на основе ВТСП, свойства которых отличаются от пленочных сверхпроводников. Значительные магнитные поля могут захватываться и “вымораживаться” в ВТСП до 10 Тл при 45 К, что значительно больше, чем в обычных постоянных магнитах, и является перспективным свойством для технических применений. Однако технологии конструктивных материалов на основе объемных сверхпроводников пока уделяется мало внимания по сравнению с пленочными технологиями. Свойство объемных сверхпроводников захватывать магнитный поток при переходе в сверхпроводящее состояние можно

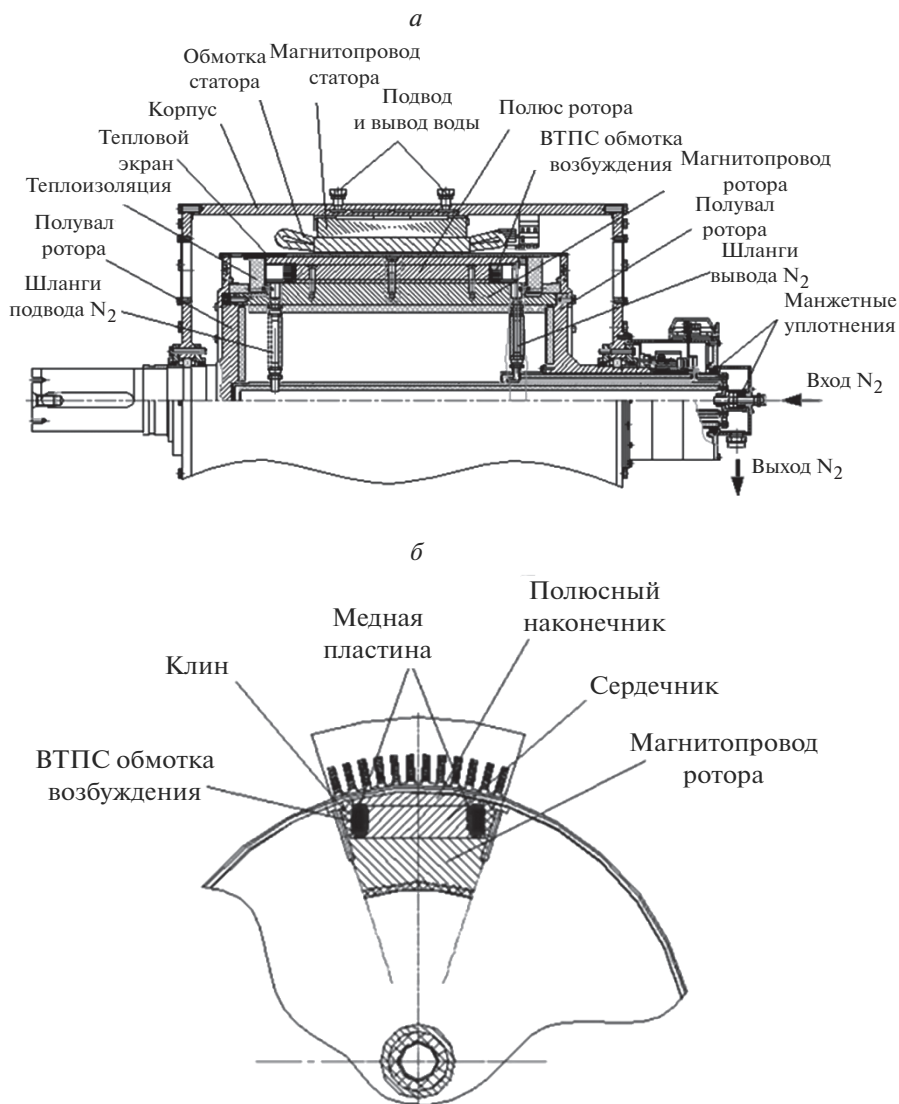


Рис. 5. Общий вид опытного образца СПСГ мощностью 2 МВА со щеточной подачей тока в обмотку возбуждения: продольный разрез (а), поперечный разрез (б).

положить в основу работы многих электромагнитных преобразователей, в частности, накопителя электромагнитной энергии.

Кинетический накопитель энергии 5 МДж на магнитном подвесе с использованием объемных ВТСП элементов включает в себя ротор, магнитный подпятник на основе кольцевых постоянных магнитов, безжелезный мотор-генератор с магнитоэлектрическим возбуждением и бесконтактные ВТСП подшипники на основе постоянных магнитов и объемных ВТСП элементов. Конструкция ротора включает в себя вал, алюминиевый диск, стальную трубу и бандаж из углеволокна. Магнитная опора представля-

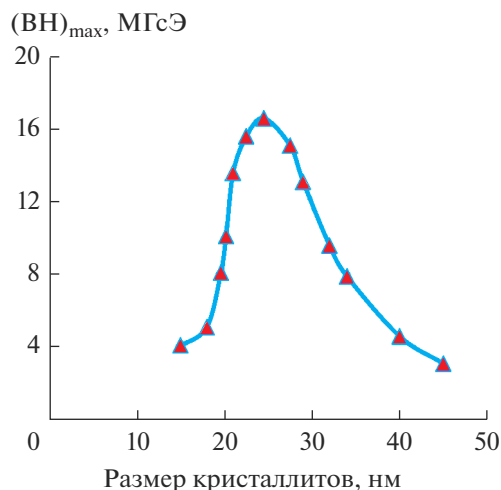


Рис. 6. Зависимость магнитной энергии от размера кристаллитов.

ет собой встречно намагниченные кольцевые постоянные магниты. Опора обеспечивает весовую разгрузку ротора. Мотор-генератор является электрической машиной с безжелезными статором и ротором, собранным по схеме Хальбаха из постоянных магнитов. Магнитные подшипники состоят из постоянных магнитов на роторе и объемных ВТСП элементов на статоре.

Магнитные материалы

Известно, что только три элемента из периодической таблицы Менделеева являются ферромагнитными при комнатной температуре — железо (Fe), кобальт (Co) и никель (Ni). Редкоземельный элемент гадолиний (Gd) становится магнитом, но только при 8°C. Можно предположить, что в широком спектре температур современные магнитные материалы должны изменять свои свойства [1]. Действительно, для сплава на основе редкоземельных металлов химического состава $Nd_2Fe_{14}B$ (неодим–железо–бор) при температуре ниже 150 К существует зона, в которой индукция магнитного поля превышает значение при комнатной температуре, и зона, где индукция резко уменьшается, причем процессы являются обратимыми.

Основные преимущества этого типа магнитов: высокое значение энергетического произведения (BH_{\max}) — больше, чем у всех известных материалов (до 520 кДж/м³); способность работать без потерь магнитных характеристик в температурном диапазоне –60 до 240°C (точка Кюри 310°C); отсутствие в составе сплава достаточно дорогого металла — кобальта — также дает преимущество магнитам этого состава перед магнитами из сплава SmCo (самарий–кобальт) по цене и масштабам производства. К недостаткам магнитов из NdFeB следует отнести низкую коррозионную стойкость, которая устраняется покрытием магнитов защитными слоями меди, цинка, никеля, хрома.

Высококоэрцитивные магниты из сплавов на основе редкоземельных металлов выбирают для системы возбуждения синхронных машин, обладающих высокой плотностью энергии. Интенсивные исследования, ведущиеся по созданию оптимальной, с точки зрения процессов перемагничивания, микроструктуры материала для постоян-

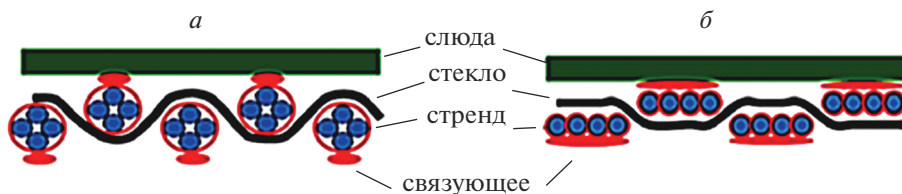


Рис. 7. Лента стандартной структуры (а) и лента с оптимизированной структурой (б).

ных магнитов [30] и перспективных технологий для получения магнитотвердых материалов, несомненно, приведут к качественному повышению их характеристик.

В качестве иллюстрации этих слов можно привести зависимость магнитной энергии от размера кристаллитов, полученную сотрудниками ФГУП ВНИИНМ: максимальная энергия магнитов системы NdFeB достигается при размере нанокристаллитов 20–30 нм и имеет ярко выраженный максимум (рис. 6).

Изоляционные материалы

Существенное значение в уровне нагревания электрических машин предельной мощности с косвенным охлаждением обмотки статора имеет перепад температуры по толщине корпусной изоляции, который может достигать уровня 30–37°C.

Для сохранения этого значения при возрастающих тепловых нагрузках производители электротехнического оборудования применяют материалы для корпусной изоляции с высоким значением рабочей напряженности электрического поля E (кВ/мм) и повышенной теплопроводностью λ (Вт/м К). Наряду с этим, весомое значение имеет повышение теплопроводности уплотнительных материалов и противокоронных покрытий, входящих в конструкцию пазовой изоляции.

Повышение значения рабочей напряженности E позволяет снизить толщину корпусной изоляции обмотки статора и, следовательно, температурный перепад в ней. Современные изоляционные материалы на базе предварительно пропитанных (“resin rich” технология) или непропитанных “сухих” лент (“single VPI”, и “global VPI” технологии на основе оптимизированной структуры) (рис. 7) повышает теплопроводность на 20–25% с сохранением диэлектрических свойств корпусной изоляции ($\lambda = 0.33$ Вт/м К) и позволяют проектировать статорную обмотку с рабочей напряженностью в диапазоне 3.2 кВ/мм. Введение в состав “сухих” или предварительно пропитанных лент наполнителей и нанонаполнителей с повышенной теплопроводностью повышает теплопроводность лент, но зачастую приводит к снижению их диэлектрической прочности и увеличению толщины. Рабочая напряженность электрического поля для корпусной изоляции из таких лент находится в пределах 2.3–2.6 кВ/мм при теплопроводности 0.3–0.55 Вт/м К [31].

Дальнейшее повышение значения E может приводить к снижению ресурса корпусной изоляции как в пазовой части обмотки, так и на выходе из паза. Особенно значимым при утонении корпусной изоляции становится технологический фактор. Так, при толщине корпусной изоляции 2.6 мм для машин с рабочим напряжением статора 15.75 кВ, в случае образования царапины глубиной 0.5 мм при укладке обмотки в пазы сердечника, значение рабочей напряженности в месте повреждения изменится с 3.5 до 4.3 кВ/мм. Такие значения для современных изоляционных материалов недопустимы, т.к. существенно снижают ресурс обмотки статора.

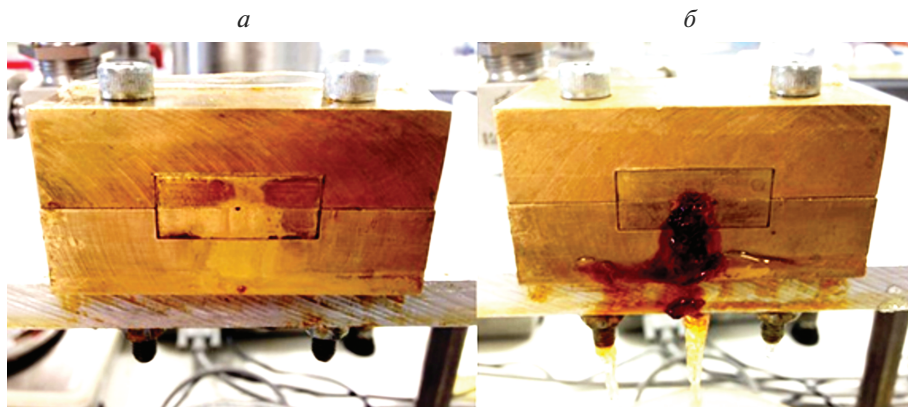


Рис. 8. Лабораторный опыт с маслонаполненным кабелем: до утечки (а), после утечки (б).

Технологический фактор может быть исключен из рассмотрения, если материалу изоляции придать самовосстанавливающие свойства. Успешные исследования самовосстанавливающихся материалов проводятся применительно к металлам, керамикам и полимерам. Специалистам известны различные стратегии и подходы для их создания [1, 2]. Необходимым условием для самовосстановления повреждения, как правило, является формирование т. н. подвижной фазы, способной “затянуть” повреждение. Для автономных самовосстанавливающихся материалов именно повреждение является импульсом или сигналом для восстановления.

В [32] приведены примеры материалов, которые продемонстрировали превосходный потенциал на лабораторных образцах и скоро будут в широкомасштабном использовании. В частности, для высоковольтных погружных кабелей предлагается использование гидрофильных термопластичных эластомеров (hydrophilic thermoplastic elastomers, h-TPEs).

Если кабель имеет не полимерную изоляцию, а является маслонаполненным кабелем, то предлагается саморемонтируемый кабель. Исследования по смешиванию изоляционных масел с олифами показали, что олифа может в присутствии атмосферного кислорода связываться межмолекулярными связями, таким образом формируя профилактическое уплотнение, которое предотвращает дальнейшую утечку изоляционного масла (рис. 8).

Появление микротрещин в материале электрической изоляции – предвестник катастрофического отказа и значительного сокращения срока службы изоляции. В [33] представлена разработка самовосстанавливающейся термореактивной электрической изоляции, предназначенная для того, чтобы остановить механически ухудшение материала. К материалу изоляции добавляют микрокапсулы, заполненные мономером (целебным агентом) и катализатором. При распространении микротрещины в материале микрокапсула ломается, выпуская в трещину жидкий восстанавливающий агент. Заключительный шаг процесса самовосстановления представляет собой полимеризацию мономера, которая происходит при контакте с катализатором, добавляемым к эпоксидной смоле.

Вторым направлением применения интеллектуальных материалов в изоляции является способ введения в состав полимерной изоляции “умных” фрагментов, способных информировать о нарушении требований заказчика к изоляции.

В [34] представлены результаты исследования полимерного материала с добавками флуорофоров, чувствительных к электрическому полю. Показано, что введение флуоресцентного твердого пирена в концентрации 5.75% оказывает минимальное влияние на электрическую пробивную прочность материала и тангенс потерь и в то же время обеспечивает хорошие полезависимые флуоресцентные спектры. Описан способ введения флуорофора в полимер, который гарантирует хорошее единообразие образцов.

В [35] описывается исследование по определению пригодности жидких кристаллов как среды, дающей видимый отклик на электрическое поле в изоляции. Показано, что жидкокристаллическое устройство может быть использовано, чтобы обнаружить и сообщить о наличии переменного и постоянного тока, что можно инкапсулировать капли жидкого кристалла в принимающей полимер и сформировать полимерную дисперсную жидкокристаллическую систему (polymer dispersed liquid crystal, PDLC). Дальнейшая работа авторов предполагает изучение PDLC как интеллектуального материала, реагирующего на электрическое поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспектива развития интеллектуальной электроэнергетики определяется в первую очередь функциональными материалами, созданными на основе достижений наукоемких технологий, — интеллектуальными материалами, свойства которых изменяются при воздействии каких-либо внешних факторов.

Способность ИМ преобразовывать один вид энергии в другой и возможность управлять этим преобразованием позволили создать для выполнения сложных функций различные датчики и исполнительные устройства, которые широко используются в электроэнергетике страны.

Применение ИМ для улучшения характеристик электрооборудования энергетического назначения дает очевидные преимущества при создании высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий, снижает массогабаритные показатели в два—три раза для ВТСП трансформаторов и электрических машин, повышает КПД оборудования за счет увеличения плотности тока в обмотках на несколько порядков по сравнению традиционными.

Интенсивные исследования, ведущиеся по созданию оптимальной, с точки зрения процессов перемагничивания, микроструктуры материала для постоянных магнитов и перспективных технологий для получения магнитотвердых материалов, несомненно, приведут к качественному повышению их характеристик.

Разработка самовосстанавливающейся термореактивной электрической изоляции с целью предотвращения механического ухудшения материала, и введение в состав полимерной изоляции “умных” фрагментов, способных информировать о нарушении требований заказчика к изоляции, значительно повышают надежность электрооборудования.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИХС РАН (№ гос. регистрации темы АААА-А19-119022290086-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беликов Д.В.* Предложения по приоритетным направлениям развития новых материалов и нанотехнологий двойного назначения и анализ возможных областей их применения // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2018. № 1(22). С. 123—134.
2. *Беликов Д.В., Марышев Е.А., Миронов Н.А.* Проблемы создания и внедрения перспективных материалов для системы вооружения — взгляд экспертов федерального реестра научно-технической сферы // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2016. № 2(17). С. 220—228.

3. Мошников В.А., Шилова О.А. Золь-гель-наноконпозиты – перспективные материалы для мембран и каталитических слоев топливных элементов // В кн. Основы водородной энергетики. С.-Петербург: Изд-во: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”. 2010. С. 183–211.
4. Suzdaltsev A.V., Nikolaev A.Yu., Zaikov Yu.P. Modern ways for obtaining Al–Sc master alloys: A review // Tsvetnye Metally. 2018. № 1. P. 69.
5. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Новые проводниковые материалы и их влияние на параметры высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии // Электричество. 2019. № 5. С. 24–32.
6. Бхавсар Р., Вайдья Н., Гангули П., Хамфрис А., Роббинсон А., Ту Х., Уикс Н. Новые интеллектуальные материалы // Нефтегазовое обозрение. 2008. № 1. С. 38–49.
7. Глебов И.А., Черноплеков Н.А., Альтов В.А. Сверхпроводниковые технологии – новый этап в развитии электротехники и энергетики // Сверхпроводимость: исследования и разработки. 2002. № 11. С. 5–15.
8. Сытников В.Е. Сверхпроводящие кабельные линии: состояние вопроса и перспективы // Академия энергетики. 2011. № 6(44). С. 74–83.
9. Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А. Сверхпроводящие трансформаторы. М.: Научтехлитиздат, 2002. 206 с.
10. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Мировая ветроэнергетика мегаваттного диапазона мощностей // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2019. № 2 (27). С. 94–105.
11. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Электрические генераторы мегаваттного диапазона мощности для ветроэнергетики: состояние и тенденции развития // Электричество. 2019. № 8. С. 34–41.
12. Сытников В.Е., Высоцкий В.С. Основы конструирования высокотемпературных сверхпроводящих силовых кабелей // Изв. РАН. Энергетика. 2008. № 1. С. 89–107.
13. Волков Э.П., Высоцкий В.С., Карпышев А.В., Костюк В.В., Сытников В.Е., Фирсов В.П. Создание первого в России высокотемпературного сверхпроводящего кабеля // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 4. С. 31–43.
14. Geschiere A., Willén D., Piga E., Barendregt P., Royal J., Lynch N. Long distance Triax HTS cable // Proc. of CIREN 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, Austria, 21–24 May 2007. Paper No. 0196.
15. Kojima H., Kotari M., Kito T., Hayakawa N. Current limiting and recovery characteristics of 2 MBA class superconducting fault current limiting transformer // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. No. 3. P. 1401–1404.
16. Wojtasiewicz G., Janowski T., Kozak S., Kozak J., Majka M., Kondratowicz-Kucewicz B. Experimental investigation of the model of superconducting transformer with the winding made of 2G HTS tape // IEEE Trans Appl. Supercond. 2012. V. 22. № 3. Art. № 5500504.
17. Dai S., Xiao L., Wang Z., Guo W., Zhang J., Zhang D., Gao Z., Song N., Zhang Z., Zhu Z., Zhang F., Xu X., Qiu Q., Lin L. Development and demonstration of 1 MJ High – Tc SMES // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2012. V. 22. № 3. Art. № 5700304.
18. Staines M., Pannu M., Staines M., Glasson N., Pannu M., Thakur K.P., Badcock R., Allpress N., D’Souza Premal, Talantsev E. The development of a Roebel cable based 1 MBA HTS transformer // Superconductor Science and Technology. 2011. № 25(1), 014002.
19. Wang Y., Zhao X., Han J., Li H., Guan Y., Bao Q., Xiao L., Lin L., Xu X., Song N., Zhang F. Development and test in grid of 630 kVA three-phase high temperature superconducting transformer // Front. Electr. Electron. Eng. China. 2009. V. 4(1). P. 104–113.
20. Волков Э.П., Джафаров Э.А. Сверхпроводящий трансформатор с вращающимся магнитным полем // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 3. С. 113–121.
21. Волков Э.П., Джафаров Э.А. ВТСП трансформатор с локализованным магнитным полем // Изв. РАН. Энергетика. 2013. № 5. С. 3–10.
22. Волков Э.П., Джафаров Э.А. Параметры ВТСП трансформатора // Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 1. С. 62–73.
23. Волков Э.П., Джафаров Э.А., Флейшман Л.С., Высоцкий В.С., Суконкин В.В. Первый в России ВТСП трансформатор 1 МВА, 10/0.4 кВ // Изв. РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 45–56.
24. AMSC. Sea Titan TM 10 MW Wind Turbine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amsc.com/documents/seatitan-10-mw-wind-turbine-data-shee> (дата обращения: 15.12.2020).
25. Snitchier G., Gamble B., King C. 10 MW class superconductor wind turbine generators // IEEE Trans. Appl. supercond. 2011. V. 21. № 3. P. 1089–1092.

26. *Fair R., Stautner W., Douglass M., Rajput-Ghoshal R., Moscinski M., Riley P., Wagner D., Kim J., Hou S., Lopez F., Haran K., Bray J., Laskaris T., Rochford J., Duckworth R.* Superconductivity for Large-Scale Wind Turbines. Final Scientific Report. April 2012. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1052970> (дата обращения: 15.12.2020).
27. *Advance Magnetic Lab.* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.magnetlab.com> (дата обращения: 15.12.2020).
28. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников / Под ред. Ковалева Л.К., Ковалева К.Л. и Конеева С.М.-А. М.: Физматлит, 2010. 394 с.
29. *Ковалев К.Л., Полтавец В.Н., Колчанова И.П., Ильясов Р.И., Фирсов В.П.* Высокотемпературный сверхпроводниковый генератор мощностью 1 МВА для ветроэнергетических установок // Электричество. 2017. № 10. С. 4–15.
30. *Михайлин С.В., Туров В.Д.* Патент РФ 2118007. Материал для постоянных магнитов. Опубл. 20.08.1998.
31. *Азизов А.Ш., Андреев А.М., Костельов А.М., Поликарпов Ю.И.* Теплопроводность системы изоляции статорной обмотки мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением // Электротехника. 2009. № 3. С. 10–14.
32. *Basu S., German I., Rhodes R., Stevens G.C., Thomas J.* Advanced materials for self-healing electrical insulation systems // Advanced materials: TechConnect Briefs. 2016. P. 153–156.
33. *Lesaint C., Risinggard V., Holto J., Sæternes H.H., Glomm W.R.* Self-healing high voltage electrical insulation materials // Proc. of Electrical Insulation Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 8–11 June 2014. P. 241–244.
34. *Holt A.F., Topley A.C., Brown R.C.D., Lewin P.L., Vaughan A.S., Lang P.* Towards Intelligent Insulation Technologies // International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, July 4–9, 2010.
35. *Holt A.F., Brown R.C.D., Lewin P.L., Vaughan A.S., Lang P.* Applications of Liquid Crystals in Intelligent Insulation // IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Bologna, Italy, June 30–July 4, 2013.